

Исследование рекомбинационных центров в облученных кристаллах p -Si

© Т.А. Пагава[¶]

Грузинский технический университет,
380075 Тбилиси, Грузия

(Получена 27 октября 2003 г. Принята к печати 4 ноября 2003 г.)

Исследовались образцы p -Si, облученные электронами с энергией 8 МэВ. На основе анализа зависимостей времени жизни неосновных носителей тока τ , удельного сопротивления ρ , концентрации p и холловской подвижности μ_H от температуры изохронного отжига T_{ann} высказано предположение, что многокомпонентные комплексы $V_3 + O$ или $V_2 + O_2$ не являются рекомбинационными центрами. Глубокие доноры с энергетическими уровнями $\Delta E_i = E_v + 0.40$ эВ, комплексы типа $V_3 + O_3$ или $V_3 + O_2$ влияют на величины μ_H и τ . По кривым изохронного отжига определены энергии активации отжига E_{ann} для таких дефектов, как K -центры, межузельный углерод C_i , комплексы $V + B$, $V_2 + O_2$, дивакансии V_2 , а также для дефектов с уровнями $\Delta E_i = E_v + 0.20$ эВ, которые равняются $E_{\text{ann}} = 0.9, 0.25, 1.6, 2, 1.54$ и 2.33 эВ соответственно.

1. Введение

Результаты работ [1,2] свидетельствуют о том, что при облучении кристаллов Si происходит существенное изменение времени жизни неосновных носителей тока τ . В работе [3] наблюдаемое возрастание и последующий спад τ при наборе дозы (Φ) в n -Si объясняется уменьшением числа рекомбинационных центров (РЦ) химической природы (Au, Cu и др.) за счет перехода их в процессе облучения в межузельное положение, а также увеличением числа радиационно-введенных РЦ и обратного растворения активной примеси в неравновесных вакансиях при больших Φ . Авторы работы [4] наблюдаемое увеличение τ от 20 до 70 мкс в кристаллах p -Si, полученных методом зонной плавки, при изменении Φ в интервале $2 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, объяснили уменьшением концентрации свободных носителей тока (p). В образцах p -Si, полученных методом Чохральского, восстановление τ не наблюдалось даже после облучения дозами, при которых концентрация носителей заряда снижалась до 10^{11} см^{-3} . По мнению авторов [5], в p -Si, изготовленном методом зонной плавки, образуются дефекты с глубокими уровнями, а в кристаллах, полученных методом Чохральского, наряду с РЦ, обладающими глубокими энергетическими уровнями, возникают РЦ с мелкими уровнями, которые определяют деградацию τ . В работе [6] показано, что τ уменьшается даже при таких $\Phi \approx 10^{10} - 10^{13} \text{ см}^{-2}$, когда удельное сопротивление ρ практически не изменяется. Уменьшение τ от 90 до ~ 20 мкс объясняется непрерывным увеличением концентрации рекомбинационно-активных радиационных дефектов (РД).

Для выяснения, какой именно центр является ответственным за изменение τ , мы изучили зависимости τ , ρ , p и холловской подвижности дырок μ_H от температуры изохронного отжига (ИО) T_{ann} в облученных кристаллах p -Si.

2. Результаты исследований и их обсуждение

Исследовались образцы монокристаллического кремния, полученные методом Чохральского, с концентрацией дырок $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, плотностью ростовых дислокаций $10^3 - 10^4 \text{ см}^{-2}$, исходным временем жизни $\tau_{\text{st}} \approx 100$ мкс. Исследуемые образцы облучались электронами с энергией 8 МэВ при комнатной температуре; величина дозы $\Phi \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ подбиралась таким образом, чтобы время жизни облученных образцов составляло $\tau_{\text{irr}} \approx \tau_{\text{st}}$; плотность потока электронов составляла $\varphi = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Изохронный отжиг облученных кристаллов производился в температурном интервале $T_{\text{ann}} \approx 80 - 600^\circ \text{C}$, с шагом 10° ; время выдержки при фиксированной температуре равнялось 10 мин. После каждого цикла ИО измерялись τ , ρ , p и μ_H ; τ измерялось по методу затухания фотопроводимости.

Избыточная концентрация носителей заряда создавалась при помощи освещения исследуемого образца импульсным потоком белого полихроматического света, пропущенного через фильтр, представляющий собой плоскопараллельную полированную пластину из кремния. Для исключения влияния центров прилипания, возникших в исследуемых образцах при облучении, в процессе измерения образцы освещались непрерывным потоком белого света. При измерении величины объемной фотоэдс вдоль облученного образца не выявлено какой-либо неоднородности, способной повлиять на результаты измерения τ . Количество избыточных носителей заряда (Δn и Δp), определенное по изменению напряжения на сопротивлении нагрузки, включенном последовательно с исследуемым образцом, не превышало нескольких процентов от равновесной концентрации дырок в этом образце (p_0), т.е. измерение τ проводили при условии малого уровня инжекции: $\Delta n = \Delta p \ll p_0$. Величины τ , ρ и μ_H измерялись при 300 К. Концентрация p измерялась методом Холла в интервале 77–300 К. Омические контакты для измерения создавались путем

[¶] E-mail: tpagava@gtu.edu.ge

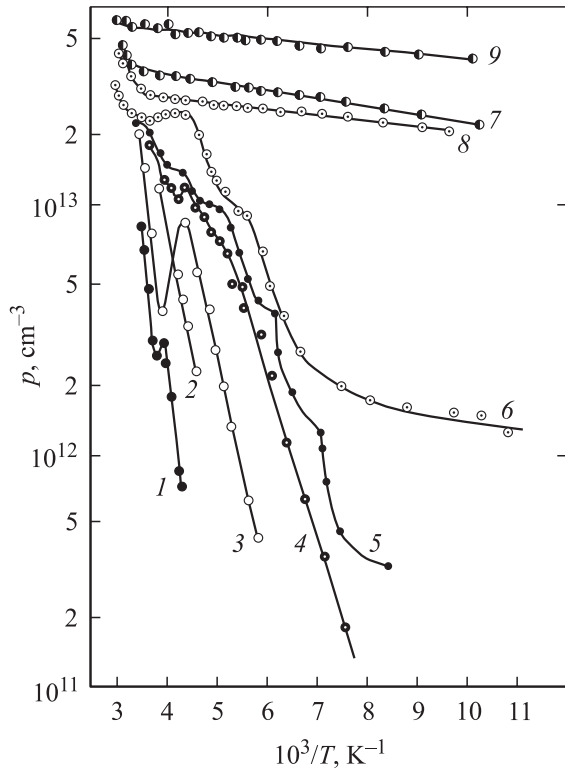


Рис. 1. Температурные зависимости концентрации дырок p для облученного электронами кристалла p -Si. Зависимость 1 получена до отжига образца. Температура отжига T_{ann} , °C: 2 — 100, 3 — 170, 4 — 240, 5 — 270, 6 — 300, 7 — 400, 8 — 500, 9 — 600.

втирания алюминия в поверхность исследуемого образца.

Изменение p в процессе ИО определялось по кривым $p(10^3/T)$ при 260 К. Ошибка измерения этой величины не превышала 10%. Энергетические уровни дефектов ΔE_i определялись в предположении $\varepsilon_F = \Delta E_i$, где ε_F — уровень Ферми, по формуле

$$p = N_v F_{1/2} \left(\frac{\varepsilon_F}{kT} \right),$$

где N_v — эффективная плотность состояний валентной зоны, $F_{1/2}$ — интеграл Ферми-Дирака. Соответствующие участки на зависимостях $p = f(10^3/T)$ выбирались с учетом степени истощения определенного уровня и кратности вырождения валентной зоны кремния (рис. 1, кривые 5, 6). В сильно компенсированных образцах ΔE_i определялись по наклону зависимостей $p = f(10^3/T)$ (рис. 1, кривые 1–4). Концентрации различных РД после каждого цикла ИО вычислялись с помощью ступенчатых зависимостей $p = f(10^3/T)$ и $p = f(T_{\text{ann}})$ в интервалах 77–300 К и 20–600°С соответственно.

На рис. 2 приведены изменения τ (кривая 1) и ρ (кривая 2) при 300 К, а на рис. 3 концентрации p (кривая 1) и подвижность μ_H (кривая 2) в зависимости от температуры ИО T_{ann} . На рис. 3 номера кривых 3–11 соот-

ветствуют номерам дефектов в таблице, где приведены их параметры — энергетические уровни ΔE_i , интервалы температуры отжига T_{ann} , эффективность введения дефектов $\eta = dN_{\text{rd}}/d\Phi$ (N_{rd} — концентрация РД), энергия активации отжига E_{ann} и возможная идентификация типа дефектов.

Как видно из рис. 3, в интервале $T_{\text{ann}} = 20$ –110°С отжигаются дефекты с уровнем $\Delta E = E_v + 0.28$ эВ (кривая 3). Концентрация этих дефектов $N_3 = 3 \cdot 10^{12}$ см⁻³. Они идентифицированы как межузельные атомы углерода C_i [7]. Изменение концентрации дырок Δp_1 (кривая 1)

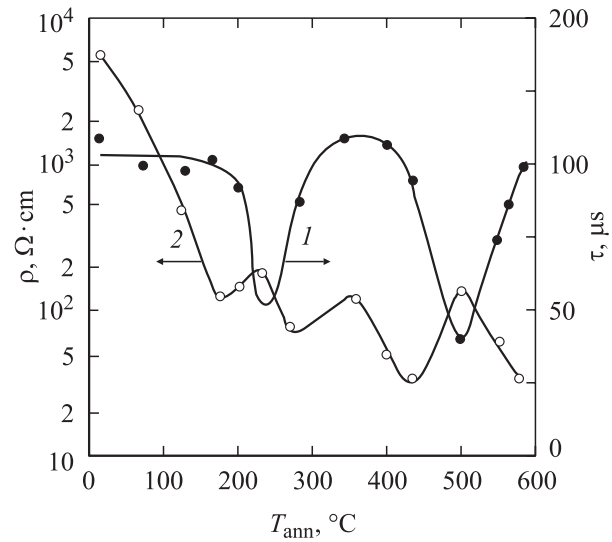


Рис. 2. Зависимости времени жизни неосновных носителей тока τ (1) и удельного сопротивления ρ (2) от температуры изохронного отжига T_{ann} в облученных электронами кристаллах p -Si. $T \approx 300$ К.

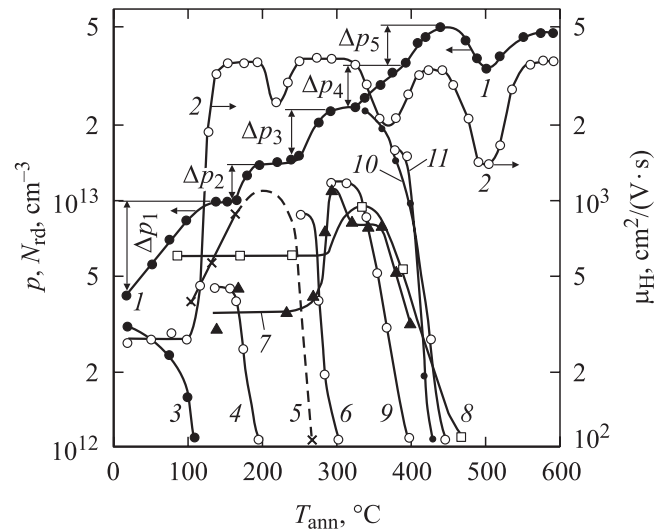


Рис. 3. Изменение концентрации дырок p (1), холловской подвижности μ_H (2) основных носителей тока, а также концентрации некоторых радиационных дефектов N_{rd} (3–11) в процессе изохронного отжига в облученных электронами кристаллах p -Si.

№	ΔE_i , эВ	T_{ann} , °C	η , см $^{-1}$	E_{ann} , эВ	Возможная идентификация
3	$E_v + 0.28$	20–110	$2.2 \cdot 10^{-3}$	0.25	C_i
4	$E_v + 0.45$	170–200	$3.3 \cdot 10^{-3}$	1.6	$V + B$
5	$E_v + 0.18$	210–270	$3.0 \cdot 10^{-3}$	–	B_i
6	$E_v + 0.28$	260–300	$6.0 \cdot 10^{-3}$	1.54	V_2
7	$E_v + 0.22$	300–330 360–400	$2.6 \cdot 10^{-3}$	–	$V + ?$
8	$E_v + 0.20$	340–470	$4.4 \cdot 10^{-3}$	2.33	$V + ?$
9	$E_v + 0.40$	360–400	$9.0 \cdot 10^{-3}$	2.0	$V_3 + O$ $V_2 + O_2$
10	$E_v + 0.35$	330–430	$18 \cdot 10^{-3}$	0.9	K -центр $V_2 + O + C$
11	$E_v + 0.36$	400–450	$11 \cdot 10^{-3}$	–	–
*	$E_v + 0.40$	500–550	–	–	$V_3 + O_3$

Примечание. * Образован в процессе изохронного отжига.

в этом температурном интервале в 2 раза больше ($\Delta p_1 \approx 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$), чем концентрация атомов C_i . Это свидетельствует о том, что в этом интервале отжигаются и другие дефекты. Таковыми могут быть тетравакансии V_4 [8]. По-видимому, резкое увеличение подвижности μ_H (кривая 2 на рис. 3) в интервале 20–160°C связано с отжигом многовакансионных центров V_4 . Следует отметить, что в этом температурном интервале происходит также перестройка и отжиг дефектно-примесной оболочки разупорядоченных областей. При этом τ практически не изменяется (рис. 2, кривая 1).

В интервале $T_{\text{ann}} \approx 170$ –200°C резкое увеличение p связано с отжигом дефектов с уровнем энергии $E_v + 0.45$ эВ и с концентрацией $N_{\text{rd}} \approx 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (рис. 3, кривые 1, 4). Этот уровень принадлежит комплексу $V + B$ [9].

По нашим расчетам, в кристаллах кремния p -типа с концентрацией $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, облученных электронами с энергией 8 МэВ, образуются разупорядоченные области (РО) с эффективным радиусом $R_{\text{eff}} \approx 5 \cdot 10^3 \text{ \AA}$. Вакансии — продукты распада комплексов $V + B$ эффективно поглощаются РО, что приводит к увеличению R_{eff} . При $T_{\text{ann}} \approx 220^\circ\text{C}$ начинается отжиг РО [10] и уменьшение R_{eff} . Этим можно объяснить наличие минимума при $T_{\text{ann}} \approx 230^\circ\text{C}$ на кривых зависимостей $\mu_H(T_{\text{ann}})$ (рис. 3, кривая 2) и максимума на $\rho(T_{\text{ann}})$ (рис. 2, кривая 2) соответственно.

В области $T_{\text{ann}} \approx 100$ –160°C наблюдается увеличение концентрации центра с уровнем $E_v + 0.18$ эВ (рис. 3, кривая 5), которая, по-видимому, (нам не удалось проследить за изменением концентрации этого центра в интервале 170–260°C) при 220°C проходит через максимум, а в области $T_{\text{ann}} \approx 270^\circ\text{C}$ эти центры полностью отжигаются. Уровень $E_v + 0.18$ эВ принадлежит атомам бора в междоузлиях B_i , которые образуются в

процессе облучения в соответствии с реакцией Уоткинса: $B_s + I \rightarrow B_i$, [11,12]. Увеличение концентрации B_i , видимо, связано с отжигом комплексов $V + B$. Концентрация B_i растет до начала отжига комплексов $V + B$, а максимальная концентрация B_i в 2 раза больше, чем концентрация $V + B$. Это указывает на существование и других механизмов образования B_i . По-видимому, источником B_i до отжига комплекса $V + B$ является комплекс $C + B$, который, по мнению авторов [7], отжигается в области 90°C. Изменение концентрации B_i не влияет на концентрацию дырок p при 300 К, но приводит к существенному изменению τ (рис. 2, кривая 1). Постоянство p в процессе отжига дефектов B_i свидетельствует о том, что они не возвращаются в узлы решетки, что привело бы к увеличению p , а уходят на другие стоки, образуя мелкие доноры, например $V + O + B_i$ [13].

В температурном интервале $T_{\text{ann}} \approx 200$ –300°C отжигается центр с уровнем $\Delta E_6 = E_v + 0.28$ эВ и с концентрацией $\sim 9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (рис. 3, кривые 1, 6). Судя по величинам T_{ann} и ΔE_i , этими центрами являются дивакансии V_2 [9]. Отжиг дивакансий сопровождается резким увеличением τ и уменьшением ρ (рис. 2, кривые 1, 2). Концентрация отожженных дивакансий (ДВ) $N_{V_2} \approx \Delta p_3 \approx 9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (рис. 3, кривая 1). Это свидетельствует о том, что при распаде ДВ не образуются другие глубокие доноры, образование которых уменьшило бы значение Δp_3 и нарушило бы равенство этих величин. В процессе отжига ДВ наблюдается увеличение концентрации дефектов с уровнем $\Delta E_i = E_v + 22$ эВ, которые отжигаются в 2 этапа: в интервалах $T_{\text{ann}} \approx 300$ –330°C и 360–400°C. Первый этап отжига этого центра сопровождается увеличением концентрации дефекта с уровнем $E_v + 0.20$ эВ, который при 340°C проходит через максимум и полностью отжигается в области 470°C. Природа этих дефектов неизвестна. Можно только сказать, что они содержат вакансии, так как их концентрации растут в процессе отжига ДВ. Судя по величине $E_{\text{ann}} \approx 2.33$ эВ и $T_{\text{ann}} \approx 470^\circ\text{C}$, центр с уровнем $E_v + 0.20$ эВ, по-видимому, является многокомпонентным дефектом [8] (рис. 3, кривые 7, 8). Эти дефекты при $T \approx 300$ К не влияют на τ , p , ρ и μ_H . В этом же температурном интервале отжигаются центры с $\Delta E_i = 0.40$ эВ (рис. 3, кривая 9). Судя по величинам ΔE_i и T_{ann} , они являются многокомпонентными комплексами типа $V_3 + O$ или $V_2 + O_2$ [8,14]. На μ_H и τ они не влияют (см. рис. 2 и 3). При $T_{\text{ann}} \approx 340^\circ\text{C}$ начинается отжиг центра с $\Delta E_i = E_v + 0.35$ эВ и возрастание концентрации дырок p (рис. 3, кривые 1, 10). Этот уровень принадлежит K -центру, который образуется в результате присоединения V_2 на CO -центр [15]. По мнению авторов [16], этот комплекс имеет структуру $C + O_2 + V$. Авторы работы [17] считают, что в K -центр входят кислород, углерод и вакансия $O + C + V$. Согласно же [18], в K -центр входят только кислород и углерод $C + O$. Концентрация K -центров $N_K \approx 2.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (рис. 3, кривая 10).

В области $T_{\text{ann}} \approx 400\text{--}450^\circ\text{C}$ наблюдается отжиг дефектов с уровнем $E_v + 0.36\text{ эВ}$. Концентрация этого дефекта $\Delta p_5 \approx 1.5 \cdot 10^{13}\text{ см}^{-3}$ (рис. 3, кривые I, II). В пределах ошибки определения уровня дефектов $E_v + 0.35\text{ эВ}$ и $E_v + 0.36\text{ эВ}$ их невозможно различить, но отжиг дефекта с уровнем $E_v + 0.36\text{ эВ}$ начинается при более высокой температуре и в этом же температурном интервале ($400\text{--}440^\circ\text{C}$) наблюдается резкое увеличение концентрации дырок (рис. 3, кривая I). Эти дефекты вместе с K -центрами способны эффективно рассеивать дырки, чем можно объяснить наличие минимума на кривой зависимости $\mu_{\text{H}}(T_{\text{ann}})$ (рис. 3, кривая 2) и соответственно максимума на кривой $\rho(T_{\text{ann}})$ при $T_{\text{ann}} \approx 360^\circ\text{C}$ (рис. 2, кривая 2). Зависимость $\tau(T_{\text{ann}})$ при этой температуре проходит через максимум (рис. 2, кривая I). Увеличением μ_{H} и p обусловлено резкое уменьшение ρ в интервале $T_{\text{ann}} \approx 360\text{--}420^\circ\text{C}$. Суммарная концентрация дефектов с уровнями $E_v + 0.40, 0.35, 0.36\text{ эВ}$, которые отжигаются в интервале $340\text{--}440^\circ\text{C}$, больше, чем изменение концентрации дырок $\Delta p = \Delta p_4 + \Delta p_5$ в этой области температур отжига (рис. 3). Это свидетельствует о том, что при отжиге этих дефектов образуются глубокие центры с высокой термостабильностью, концентрация которых растет и после отжига этих дефектов. В этом случае наблюдается равенство: $\Delta N'_{\text{rd}} = \Delta p + \Delta N'_{\text{rd}}$, где $\Delta N'_{\text{rd}}$ — концентрация отожженных РД, Δp — прирост концентрации дырок, $\Delta N'_{\text{rd}}$ — концентрация образующихся глубоких доноров в процессе ИО с учетом того, что $p \gtrsim N_{\text{rd}} + \Delta N'_{\text{rd}}$ при любой температуре ИО. Образование и отжиг этих комплексов приводит к появлению минимума на кривой зависимости $p(T_{\text{ann}})$ при 500°C . Концентрация дырок уменьшается до $3.5 \cdot 10^{13}\text{ см}^{-3}$ и при $T_{\text{ann}} = 600^\circ\text{C}$ достигает исходного значения, которое было при $T_{\text{ann}} \approx 450^\circ\text{C}$. Из сопоставления кривых 8 и 9 на рис. 1 при $T = 200\text{ К}$ можно определить концентрацию этих дефектов. Она равняется $2.5 \cdot 10^{13}\text{ см}^{-3}$. При $T_{\text{ann}} \approx 500^\circ\text{C}$ кривые $p(T_{\text{ann}})$ и $\mu(T_{\text{ann}})$ имеют минимумы (рис. 3), что приводит к существованию максимума на кривой $\rho(T_{\text{ann}})$ (рис. 2, кривая 2). Как видно из рис. 2 (кривая I), зависимость $\tau(T_{\text{ann}})$ при 500°C проходит через минимум, а при $T_{\text{ann}} = 600^\circ\text{C}$ достигает исходного значения. Судя по температурам образования и отжига, обсуждаемые выше дефекты, видимо, являются многокомпонентными комплексами типа $V_3 + O_3$ или $V_3 + O_2$ с $\Delta E_i = E_v + 0.40\text{ эВ}$ [8,19], которые образуются после распада комплексов $V_3 + O, V_2 + O_2, K$ -центров и дефектов с $\Delta E_i = E_v + 0.36\text{ эВ}$. Влияние этих комплексов при 300 К на величины p, μ_{H} и τ позволяет предположить, что они являются РЦ с глубокими уровнями, способными эффективно рассеивать дырки.

Следует отметить, что значение T_{ann} наблюдаемых нами комплексов смещено в сторону низких температур, что, видимо, связано с наличием РО в объеме кристалла после облучения электронами с энергией 8 МэВ . РО являются эффективными стоками вакансий, продуктов распада вторичных РД и снижают величину T_{ann} последних. Как известно [10], изолированные РО в кристаллах

кремния отжигаются в интервале $200\text{--}260^\circ\text{C}$, а их аморфизированные скопления — при 570°C , и поэтому они могут повлиять на величину T_{ann} всех известных вторичных РД.

В облученных кристаллах p -Si, ввиду многообразия РД, трудно создать условия, в которых процесс рекомбинации полностью определяли бы дефекты одного типа, что позволило бы нам определить параметры РЦ из температурных зависимостей τ . По этой же причине затруднены составление и решение кинетических уравнений и определение $\Delta E_i, N_{\text{rd}}$ и T_{ann} для радиационных дефектов, которые образуются в процессе облучения и ИО в кристаллах p -Si. Хотя сопоставление кривых ИО для τ, ρ, p и μ_{H} позволяет предположить, что за изменение τ при 300 К в процессе ИО в интервале $T_{\text{ann}} \approx 200\text{--}300^\circ\text{C}$ ответственны дефекты V_i и ДВ, а в области 500°C — многокомпонентные глубокие доноры ($\Delta E_i = E_v + 0.40\text{ эВ}$) типа $V_3 + O_3$ или $V_3 + O_2$, которые являются также рассеивающими центрами. Дефекты $C_i, V_4, V_3 + O$ и $V_2 + O_2$ не обладают рекомбинационными способностями. Оказалось, что энергии активации отжига K -центров, дефектов C_i , комплексов $V + B, V_2 + O_2, V_2$ и дефектов с $\Delta E_i = E_v + 0.20\text{ эВ}$, определенные по кривым ИО этих центров [20], равняются $E_{\text{ann}} = 0.9, 0.25, 1.6, 2.0, 1.54$ и 2.33 эВ соответственно (см. таблицу).

3. Заключение

Таким образом, изучено изменение времени жизни неосновных носителей тока τ , удельного сопротивления ρ , концентрации дырок p и холловской подвижности μ_{H} основных носителей тока в облученных электронами кристаллах p -Si в процессе изохронного отжига в интервале $T_{\text{ann}} \approx 80\text{--}600^\circ\text{C}$. Анализ зависимостей τ, ρ, p и μ_{H} от температуры отжига T_{ann} позволяет предположить, что за изменение величины τ в результате отжига в интервале $T_{\text{ann}} \approx 200\text{--}300^\circ\text{C}$, наблюдаемое при температуре $T \approx 300\text{ К}$, ответственны межузельные атомы бора V_i и дивакансии V_2 , а в области $T_{\text{ann}} \approx 500^\circ\text{C}$ — многокомпонентные глубокие доноры с уровнем энергии $\Delta E_i = E_v + 0.40\text{ эВ}$ типа $V_3 + O_3$ или $V_3 + O_2$, которые являются также эффективными рассеивающими центрами. Дефекты $C_i, V_3 + O$ и $V_2 + O_2$ не являются рекомбинационными центрами при $T \approx 300\text{ К}$. По кривым изохронного отжига определены энергии активации отжига K -центров, межузельного углерода C_i , комплексов $V + B, V_2 + O_2$, дивакансий V_2 и дефектов с уровнем энергии $\Delta E_i = E_v + 0.20\text{ эВ}$. Они оказались равными $0.9, 0.25, 1.6, 1.54$ и 2.33 эВ соответственно.

Список литературы

- [1] В.С. Вавилов, С.И. Винтовкин, А.С. Лютович и др. ФТТ, 7, 502 (1965).
- [2] В.С. Вавилов. Действие излучений на полупроводники (М., Атомиздат, 1963).

- [3] В.В. Болотов, В.А. Коротченко, А.П. Мамонтов и др. ФТП, **14**, 2257 (1980).
- [4] З.В. Башелейшвили, В.С. Гарнык, С.Н. Горин, Т.А. Пагава. ФТП, **18**, 1714 (1984).
- [5] В.С. Гарнык, З.В. Башелейшвили. ФТП, **24**, 1485 (1990).
- [6] G. Tsintsadze, Z. Bashaleishvili, T. Pagava et al. Bull. Georgian Acad. Sci., **162** (1), 63 (2000).
- [7] В.Н. Губская, П.В. Кучинский, В.М. Ломако. ФТП, **20**, 1055 (1986).
- [8] В.В. Емцев, Т.В. Машовец. *Примеси и точечные дефекты в полупроводниках* (М., Радио и связь, 1981).
- [9] И.Д. Конозенко, А.К. Семенюк, В.И. Хиврич. *Радиационные эффекты в кремнии* (Киев, Наук. думка, 1974).
- [10] *Физические процессы в облученных полупроводниках*, под ред. Л.С. Смирнова (Новосибирск, Наука, 1977).
- [11] Н.В. Колесников, С.Е. Мальханов, М.А. Погарский. ФТП, **12**, 1836 (1978).
- [12] В.В. Лукьяница. ФТП, **33**, 921 (1999).
- [13] М.Ю. Барабаненков и др. ФТП, **33**, 897 (1999).
- [14] Ж. Бургуэн, М. Ланно. *Точечные дефекты в полупроводниках (Экспериментальные аспекты)* (М., Мир, 1985).
- [15] Y.H. Lee, J.W. Corbett, K.L. Brover. Phys. St. Sol. (a), **41**, 637 (1977).
- [16] Л.С. Берман, Н.А. Витковский, В.Н. Ломасов, В.Н. Ткаченко. ФТП, **24**, 2186 (1990).
- [17] P.M. Mooney, L.J. Cheng, M. Suly, J.D. Gerson, J.W. Corbett. Phys. Rev. B, **15**, 3836 (1977).
- [18] S.A. Londos. Jap. J. Appl. Phys., **27**, 2089 (1988).
- [19] Y.H. Lee, J.W. Corbett. Phys. Rev. B, **13**, 2653 (1976).
- [20] А. Дамаск, Дж. Динс. *Точечные дефекты в металлах* (М., Мир, 1966).

Редактор Т.А. Полянская

A study of recombination centers in an irradiated *p*-Si

T.A. Pagava

Georgian Technical University,
380075 Tbilisi, Georgia